



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 40 24 977 A 1**

⑤1 int. Cl.⁵:
G 01 B 9/02
G 01 B 11/24
G 01 B 11/00

②1 Aktenzeichen: P 40 24 977.8
②2 Anmeldetag: 7. 8. 90
④3 Offenlegungstag: 13. 2. 92

DE 40 24 977 A 1

⑦1 Anmelder:
Leonhardt, Klaus, Prof. Dr., 7257 Ditzingen, DE

⑦2 Erfinder:
gleich Anmelder

⑤4 Zweistrahlinterferometer mit $2n$ -fachem Übergang des Referenzstrahles über das Objekt unter einem Anpassungswinkel von $\arccos(1/(2n))$ zur Kompensation von Führungsfehlern, Wärmedehnungen und Schwingungen

DE 40 24 977 A 1

Anwendungsgebiet

Die Erfindung betrifft eine neue Art der Kompensation von Weglängenänderungen zwischen Meßobjekt und Interferometerkopf durch Führungsfehler, Wärmedehnungen und Schwingungen für optische Interferometer und interferometrischer Profilometer, wie sie z. B. in der Oberflächenmessung verwendet werden.

Zweck

Weglängenänderungen, die in die Armlängen optischer Interferometer eingehen, verfälschen das Meßergebnis oder machen eine Auswertung der Interferenzen unmöglich. Für hochgenaue Interferometer muß der mechanische Aufbau innerhalb der Integrationszeit der Datenaufnahme so stabil sein, daß ungewollte Weglängenänderungen, die größer als das Auflösungsvermögen sind, ausgeschlossen bleiben. Dies ist jedoch für abtastende Interferometer und interferometrische Profilometer im sub-nm-Bereich nicht mehr möglich. Daher müssen Interferometerschaltungen gefunden werden, die die Weglängenänderung in beiden Teilstrahlengängen gleichartig erfahren, so daß keine interferometrischen Phasendifferenzen entstehen. Das Interferometer ist dann gegen Führungsfehler des Abtasttisches, Wärmeverzug des Aufbaues und gegen Erschütterungen kompensiert. Das vorliegende Interferometer soll eine Kompensation vorweisen, die die Nachteile bisher bekannter Schaltungen vermeidet.

Stand der Technik

Differentialinterferometer durch Aufspalten des Abtastfokus mit einem Wollastonprisma $1/1/2$ und andere sind gegen die oben aufgeführten Störeinflüsse kompensiert. Ändert sich der Abstand zwischen Abtastkopf und Oberfläche, so geht diese Änderung gleichsinnig in beide Teilstrahlen ein. Allerdings können diese Interferometer dadurch nicht mehr die Profilhöhe in einem Abtastpunkt, sondern nur noch die örtliche Profilsteigung als differentielle Änderung zwischen den Abtastpunkten messen. Die Änderung muß entlang der Abtastlinie integriert werden, um das Höhenprofil zu erhalten. Dadurch werden kumulierende Meßfehler möglich, die hauptsächlich die langwelligen Komponenten im Ortsfrequenzspektrum verfälschen. Eine andere Möglichkeit der Kompensation stellen Interferometer mit koaxialer Referenz durch einen stark defokussierten Referenzstrahl dar $3/3/4$. Sie weisen jedoch einen komplizierten und störanfälligen Aufbau im Raum der getrennten Strahlengänge auf. Außerdem lassen Oberflächenstrukturen, die eine Ausdehnung in der Größenordnung des Referenzfleckes aufweisen, die Referenz nicht unbeeinflusst, so daß Fehler eingeführt werden. Ein entscheidender Nachteil beider Interferometerprinzipien besteht darin, daß das Ortsfrequenzspektrum an seinem langwelligen Ende auf Perioden der Größenordnung der Referenzfleckbreite beschränkt bleibt. Die mögliche Periodenlänge ist jedoch bei beiden Prinzipien grundsätzlich beschränkt. Daher ist ein Interferometer erwünscht, das einerseits eine unmittelbare Höhenmessung erlaubt, volle Kompensation der Weglängenänderungen aufweist, extrem stabil und störunanfällig ist, und ein sehr ausgedehntes Ortsfrequenzspektrum in die

Beschreibung des Prinzips des 2 n-fachen Überganges unter einem bestimmten Anpassungswinkel

Fig. 1 zeigt einen möglichen Aufbau des neuen Interferometers für den Fall $n=1$. Licht eines Lasers oder einer anderen Lichtquelle 1 läuft über Objektiv 2 zur Eintrittsluke 3 (im Falle eines punktwise abtastenden Profilometers kann dies eine Mikrolochblende zur Strahlsäuberung sein. Über den Strahlenteiler 4 und das Objektiv 5 gelangt das Licht zu dem Strahlenteiler 6. In Fig. 3 ist ein polarisierender Strahlenteiler vorgesehen. Der Objektstrahl gelangt in Transmission zu dem Abtastobjektiv 7 und wird auf die zu messende Oberfläche fokussiert. Der Fokus bildet den Abtastfleck, wobei zur Abtastung eine Relativbewegung zwischen Interferometer und Oberfläche stattfindet. Der Referenzstrahl wird durch den an 6 reflektierten Strahl gebildet. Dieser wird durch die Umlenkspiegel 8 und 9 zur Oberfläche 10 reflektiert, dort unter einem Glanzwinkel $\alpha = \arcsin(1/(2n))$ bzw. unter einem Einfallswinkel von $\varphi_{0a} = \arccos(1/(2n)) = 90^\circ - \alpha$ reflektiert. Wir nennen φ_{0a} den Anpassungswinkel. Im Falle des Interferometers nach Fig. 1 ist $n=1$, $\alpha=30^\circ$ und $\varphi_{0a}=60^\circ$. Nach der ersten Reflexion am Objekt 10 läuft der Referenzstrahl zu dem retroreflektierenden System 11, 12, von wo er zurück zur Oberfläche und von dort über denselben Weg wieder zur Strahlvereinigung am Teiler 6 reflektiert wird. Der Referenzstrahl wird durch das retroreflektierende System 2 n-mal über die Oberfläche geführt. Bei senkrechtem Einfall ($\varphi_0=0^\circ$ in Fig. 1), würde er mit 2 n-facher "optischer Übersetzung" auf Abstands- oder Objekthöhenänderungen reagieren, der Objektstrahl jedoch nur mit einfacher "optischer Übersetzung". Gleichheit der Weglängenänderungen wird jedoch dadurch erreicht, daß der Einfallswinkel des Referenzstrahles auf den Anpassungswinkel φ_{0a} eingestellt wird. Dadurch gehen im Falle $n=1$ (Fig. 1), Abstandsänderungen mit $\cos 60^\circ = 0,5$ in die optische Weglänge der Referenz ein. Es können keine interferometrischen Phasendifferenzen durch Führungsfehler, Wärmeverzug oder Schwingungen entstehen, und volle Kompensation ist erreicht. Außerdem ist das Interferometer gegen Kippungen kompensiert. Eine Realisation für $n=2$ mit dem Anpassungswinkel $\varphi_{0a} 75,522^\circ$ wird unter "Weitere Ausführungsbeispiele" beschrieben. Außer dem in Fig. 1 gezeichneten Linsen-Spiegelsystem können auch andere retroreflektierende Systeme wie z. B. Tripelprismen verwendet werden.

Für guten Kontrast der Interferenzstreifen ist eine Gleichheit der Intensitäten von Objekt und Referenzstrahl erforderlich. Setzt man verlustfreie Objektive und Umlenkspiegel voraus, so werden diese durch den Reflexionsgrad des Lichtes unter dem jeweiligen Einfallswinkel der Strahlen bestimmt. Für den Objektstrahl ergibt sich für ein Objekt aus Glas eine einmalige Reflexion unter $\varphi_0=0^\circ$, mit einem Reflexionsgrad von $|R|^2=0,042$. Für den Referenzstrahl ergibt sich für $n=1$ eine zweimalige Reflexion der Senkrechtkomponente unter dem Einfallswinkel von $\varphi_{0a}=60^\circ$, was bei einem Reflexionsgrad von $|R_\perp|^2=0,183$ (siehe $7/$, Seite 164) zu einer Intensitätsschwächung von $|R_\perp|^4=0,0335$ führt. Somit ist für Objekte aus Glas nahezu Gleichheit der Reflexionsverluste und damit guter Kontrast von $K=0,99$ gegeben. Die entsprechenden Werte für eine Oberfläche aus Aluminium sind $|R_\perp|^2=0,915$ und $|R_\perp|^4=0,9025$. Auch für andere Materialien ergeben

sich praktisch unverminderte Kontraste der Interferenzen. Ein vollständiger Abgleich mit $K \approx 1$ kann durch eine bestimmte Orientierung des Polarisators 13 vor dem Detektor herbeigeführt werden.

Die Breite des Referenzfleckes in Abtastrichtung ist $l_{\text{ref}} = d/\sin \alpha$, wobei d der Strahldurchmesser bzw. der Fleckdurchmesser des Gaußschen Strahles ist. Dadurch werden in der Profilmessung entsprechend große Profildurchmesser oder entsprechend kleine Ortsfrequenzen relevant. Die Detektion der Interferometrischen Phase kann nach den in der Interferometrie bekannten Prinzipien erfolgen. Verwendet man einen He-Ne-Monomodelaser mit Zeeman-Aufspaltung /6/, so ist 15 in Fig. 1 der Heterodyn-Meßdetektor und 17 der Heterodyn Referenzdetektor. Die Polarisatoren 13 und 16 bringen gleichpolarisierte Komponenten von Objekt- und Referenzstrahl zur Interferenz. Andere bekannte Prinzipien der interferometrischen Phasendetektion können ebenfalls realisiert werden.

Weitere Ausführungsbeispiele

Fig. 2 zeigt eine Ausführung, bei der durch ein Pentagonprisma im Strahlengang die Gleichheit der Armlängen von Objekt- und Referenzstrahlengang erreicht werden kann. Dadurch kann das Interferometer für nichtmonochromatisches Licht ("Weißlicht") angewendet werden. Der Feinabgleich für die Einstellung der Stelle nullter Ordnung kann über eine axiale Verschiebung des retroreflektierenden Systems erfolgen.

Eine Ausführung mit einem vierfachen Übergang des Referenzstrahles über die Prüflingsoberfläche ($n=2$) ist ebenfalls möglich. Dazu muß die in diesem Falle vierfache "optische Übersetzung" durch einen schrägen Übergang mit einem Glanzwinkel $\alpha = \arcsin 0,25 = 14,478^\circ$ bzw. Anpassungswinkel $\phi_{0a} 75,522^\circ$ ausgeglichen werden. Diese Ausführung hat den Vorteil, daß Objektive höherer numerischer Apertur verwendet werden können. In Fig. 3 wird die am polarisierenden Strahlenteiler reflektierte Komponente zum Objektstrahl. Der Referenzstrahl ist nach dem ersten Durchgang durch 6 parallel zur Einfallsebene polarisiert. Er durchläuft die Folge Umlenkspiegel 9 und Objekt 10. Vor dem retroreflektierenden System befindet sich eine Viertelwellenlängen-Phasenplatte 18 in Diagonalstellung. Dadurch ist der Referenzstrahl vor der zweiten Reflexion an der Oberfläche 10 senkrecht zur Zeichenebene polarisiert und wird von dem polarisierenden Strahlenteiler 6 zum Doppelpaßspiegel reflektiert. Nach der Reflexion am Doppelpaßspiegel durchläuft der Referenzstrahl den gesamten Referenzarm noch ein zweites Mal hin und zurück und ist nach dem vierten Übergang am Objekt wieder parallel zur Zeichenebene polarisiert. Er wird also am polarisierenden Strahlenteiler transmittiert und kann mit dem Objektstrahl interferieren.

Das Prinzip des $2n$ -fachen Überganges unter dem Anpassungswinkel über dem Prüfling kann auch auf Interferometer mit flächenhafter Auswertung wie z. B. Interferenzmikroskope oder Prüferinterferometer für Oberflächen angewendet werden. Dazu wird der Detektor 15 durch einen flächenhaften Bildaufnehmer wie z. B. eine CCD-Kamera ersetzt. Für $n=1$ zeigt Fig. 4 ein Ausführungsbeispiel. In diesem Falle ist es günstig, den Referenzstrahl als punktförmige Referenz unter dem Anpassungswinkel über die Oberfläche laufen zu lassen. Die Auswertung der Interferenzen kann durch die bekannten Methoden der automatischen Interferenzphasenauswertung erfolgen. Für Phasenschiebverfahren

kann eine Verschiebung des retroreflektierenden Systems 11 und 12 die Phasenschritte für den Phasenschiebealgorithmus erzeugen.

Literatur

- 1/ G. E. Sommargreen, Optical heterodyne profilometry, Appl. Optics 20 (1981) 610 ... 618.
- 2/ G. Makosch, B. Solf, Surface profiling by electro-optical measurements, SPIE Vol. 316 (1981).
- 3/ C. C. Huang, Optical heterodyne profilometer, Opt. Eng. 23 (1984) 365 ...
- 4/ D. Pantzer, J. Politch and L. Ek, Heterodyne profiling instrument for the angstrom region, Appl. Optics 25 (1986) 4168 ...
- 5/ K. Leonhardt, Optische Interferenzen, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1981.
- 6/ Laser Interferometer, Produktbeschreibung, Hewlett-Packard Journal 21, Nr. 12, 1970.
- 7/ MPP 2000 Non-contact Surface Profiler, Produktbeschreibung, Photographic Science Corporation, Webster, New York, 1987.

Patentansprüche

1. Interferometer und Interferenzprinzip zur Kompensation von Störungen durch Führungsfehler des Abtastisches, Wärmeverzug und Schwingungen des Aufbaues, dadurch gekennzeichnet, daß der Referenzstrahl $2n$ mal über die Oberfläche geführt wird ($n=1, 2 \dots$) und dabei der Einfallswinkel $\arccos(1/2n)$ eingehalten wird.
2. Interferometer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Licht durch den Strahlenteiler 6 in Fig. 1 in einen Objekt- und einen Referenzstrahl aufgeteilt wird, der Objektstrahl über das Objektiv 7 unter senkrechtem Einfall auf die zu untersuchende Oberfläche fällt und von dort reflektiert wird, während der Referenzstrahl über die Umlenkspiegel 8 und 9 unter einem Einfallswinkel von 60° schräg an der Oberfläche 10 reflektiert wird, anschließend durch das retroreflektierende System in wieder über die Oberfläche und die Umlenkspiegel 9 und 8 zum Strahlenteiler 6 geführt wird und nach Wiedervereinigung mit dem Objektstrahl zur Interferenz gebracht wird.
3. Interferometer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Referenzstrahl 4 mal über die Oberfläche läuft (Fig. 3), wobei der einlaufende Strahl durch den Strahlenteiler 6 in einen Objekt- und einen Referenzstrahl aufgeteilt wird, der Objektstrahl unter senkrechtem Einfall einmal an der Oberfläche reflektiert wird, während der Referenzstrahl unter einem Einfallswinkel von $75,52^\circ$ über die Oberfläche läuft, vor dem retroreflektierenden System sich eine Viertelwellenlängenplatte in Diagonalstellung befindet, so daß das Licht nach einem zweimaligen Durchlauf in seiner Schwingungsrichtung um 90° gedreht ist und das zum polarisierenden Teilerwürfel zurücklaufende Licht zum Doppelpaßspiegel 19 reflektiert wird, der Doppelpaßspiegel den Referenzstrahl in sich zurücklaufen läßt und der ganze Referenzarm noch einmal durchlaufen wird, wobei nach dem vierten Übergang über die Oberfläche der polarisierende Strahlenteiler in Transmission durchsetzt wird, so daß Objekt- und Referenzstrahl nach einem Polarisator in Diagonalstellung miteinander interferieren.

4. Interferometer nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Viertelwellenplatte (18) im Referenzarm unmittelbar bei dem polarisierenden Strahlenteiler positioniert wird (gestrichelt gezeichnet in Fig. 3).

5

5. Interferometer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein zweidimensionales Objektfeld auf der Prüflingsoberfläche im Sinne eines Interferenzmikroskopes auf einem Bildsensor abgebildet wird und der Referenzstrahl als punktförmige Referenz 2 n-fach unter dem Anpassungswinkel schräg über die Oberfläche läuft.

10

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

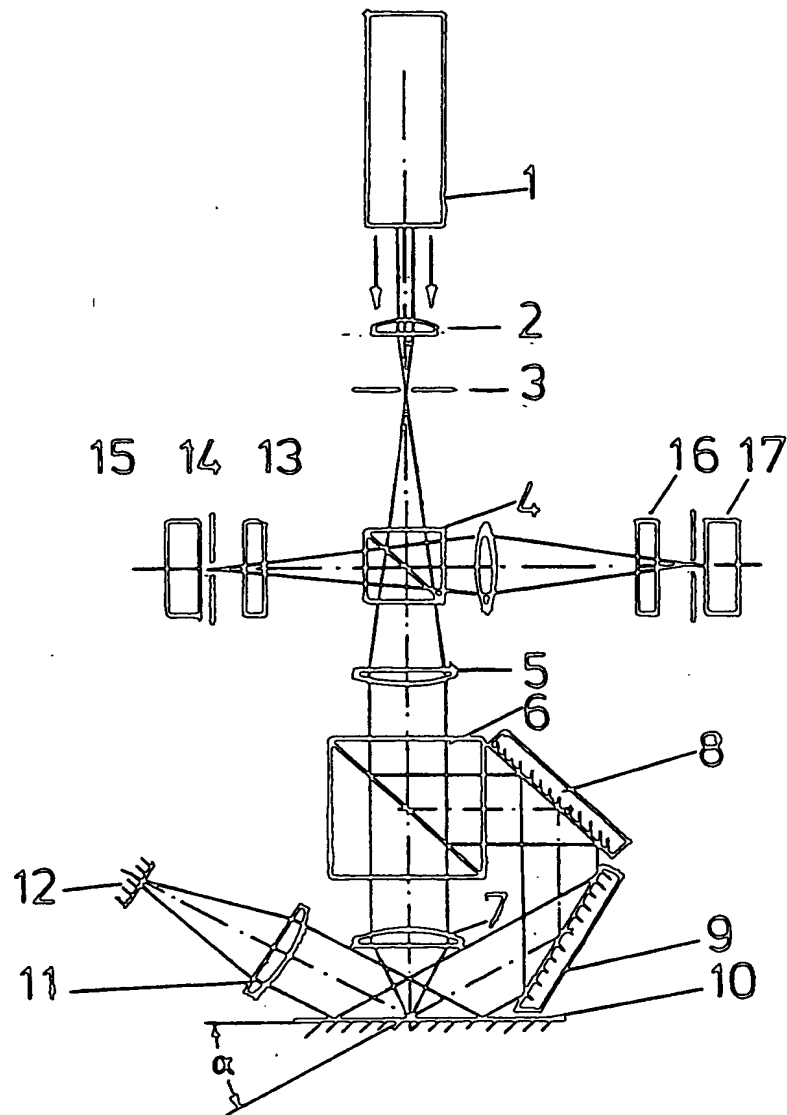


Fig. 1

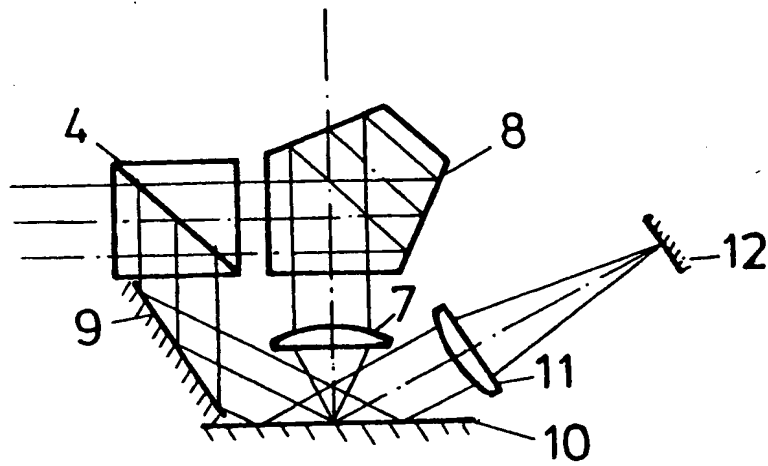


Fig. 2

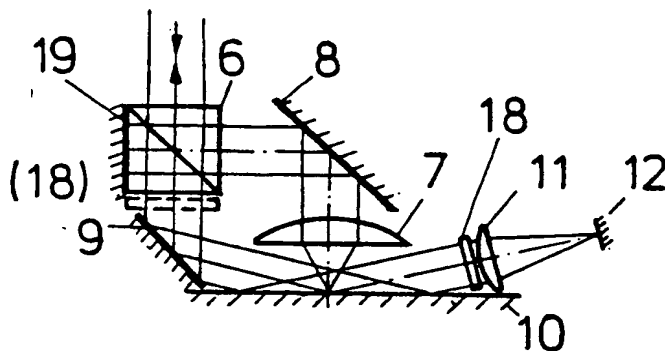


Fig.3

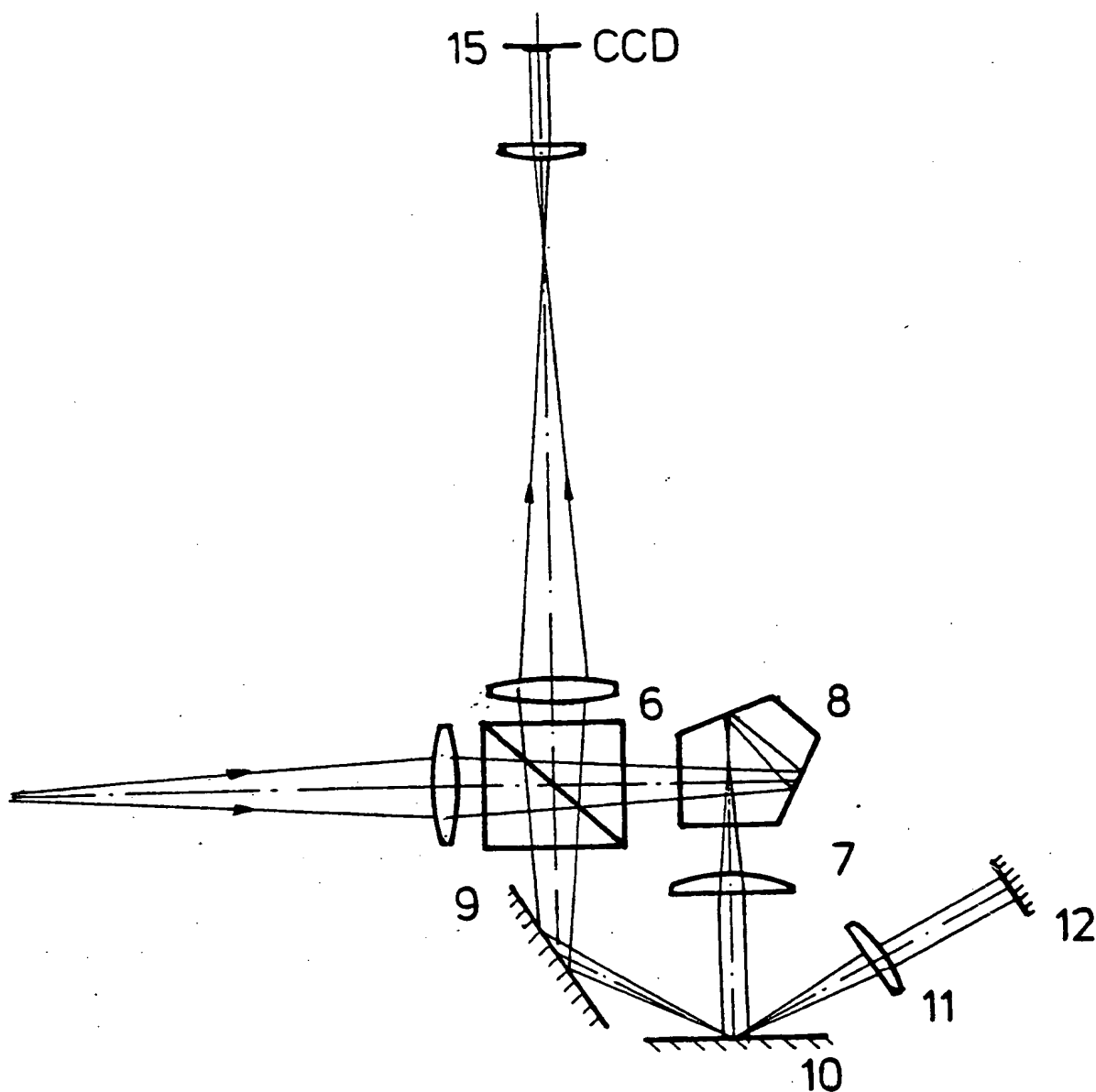


Fig. 4